

ОБНАРУЖЕНИЕ ПРОТЯЖЕННЫХ ОБЪЕКТОВ СРЕДСТВАМИ ТИПОВОГО ИМПУЛЬСНОГО РАДИОВЫСОТОМЕРА

Сорокин А. К., Важенин В. Г.

Институт радиоэлектроники и информационных технологий
Уральского федерального университета
ул. Мира, 32, Екатеринбург, Свердловской обл., 620002, Россия
тел.: (343) 3759754, e-mail: atomdistortion@mail.ru

Аннотация — Алгоритм обнаружения протяженных объектов основан на статистической обработке отраженного сигнала импульсного радиовысотомера. Для принятия решения используется метод максимума апостериорной вероятности. Минимум максимума апостериорной вероятности определяет положение границ протяженного объекта. В статье показаны два режима, реализующие разработанный алгоритм: типовой режим работы РВС и режим доплеровской фильтрации. Приведены результаты натурных испытаний, подтвердившие правильность разработанного алгоритма.

THE DETECTION OF LENGTHENED OBJECTS BY PULSE ALTIMETER

Sorokin A. K., Vazhenin V. G.

Ural Federal University Institute of Radioelectronics and Information Technologies
32, Mira str., Yekaterinburg city, Sverdlovskaya reg.
6200002, Russian Federation
Ph.: (343) 3759754, e-mail: atomdistortion@mail.ru

Abstract — The algorithm of lengthened objects detection is based on statistical processing of reflected pulse altimeter signal. We use method of maximum posteriori probability to make a decision. Minimum of maximum posteriori probability accorded with lengthened objects position. We use this fact to detect their position. This algorithm allows to realize autonomic navigation. In this paper it is shown two cases of the algorithm realization. The first method is based on the typical regime of radar altimeter and the second is based on the application of the Doppler's filtration. The results of flight experiments are introduced in this article, which approved the correctness of the created algorithm.

I. Введение

В статье [1] была показана необходимость создания надежной навигационной системы для летательных аппаратов (ЛА), не зависимой от спутниковой навигационной системы. В данном исследовании мы применили бортовой импульсный радиовысотомер [2] в качестве датчика с несущей длиной волны 7 см. Этот алгоритм создан для маршрутной части траектории, когда эволюции ЛА не превышают 10° .

При решении задачи обнаружения протяженных объектов (ПО) были исследованы свойства подстилающих поверхностей [3], на основе которых были рассчитаны эталонные распределения амплитуды отраженного сигнала. В [1] показано, что в приемнике отраженный от подстилающей поверхности

сигнал после прохождения квадратурного тракта принимает вид рэлеевского распределения. Данные распределения позволяют путем сравнения с распределениями, полученными в результате летных или модельных испытаний, оценивать степень

совпадения эталонного распределения с текущим. Сравнение производится в виде оценки площади пересечения эталонного и текущего изображения (см. рис. 1). В результате расчета площади имеем вероятность правильного обнаружения, минимум зависимости вероятности правильного обнаружения от времени показывает момент пересечения границы раздела сред.

При моделировании используется факетная феноменологическая модель сигнала, отраженного от подстилающей поверхности, рассмотренная в [1].

В данной работе развиваются положения [1] в применении к ПО вида полоса, а также рассчитываются точности обнаружения границ

раздела сред, образованные протяженными объектами.

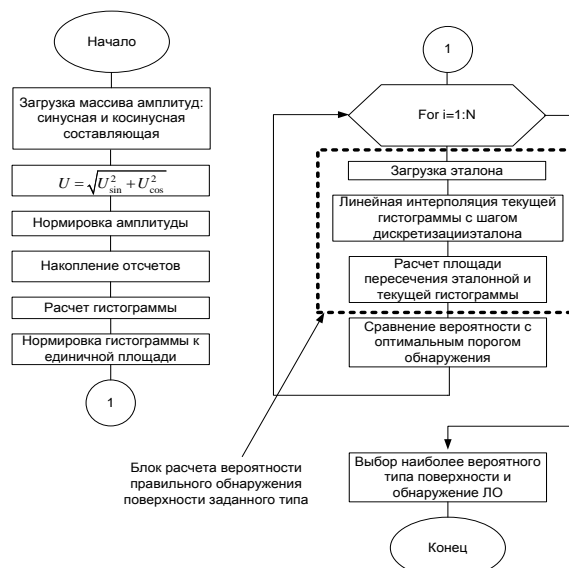


Рис. 1. Алгоритм обнаружения протяженного объекта
Fig.1 The algorithm of the lengthened objects (LO) detection

II. Типовой режим работы РВС

Модельный эксперимент организован в соответствии с рис. 2. Комбинации подстилающих поверхностей, пригодные для обнаружения ПО описаны

в [1]. Результаты испытаний для случая «лес/асфальт» приведены на рис. 3.

Согласно рис. 3, реальная граница раздела сред симметрично смещена относительно обнаруживаемых алгоритмом границ, что обусловлено смещением минимума функции

Сведем результаты модельных испытаний по обнаружению ПО различных типов в таблицу 1, для $\Theta=[30^\circ;90^\circ]$ и для различных соотношений сигнал/шум.

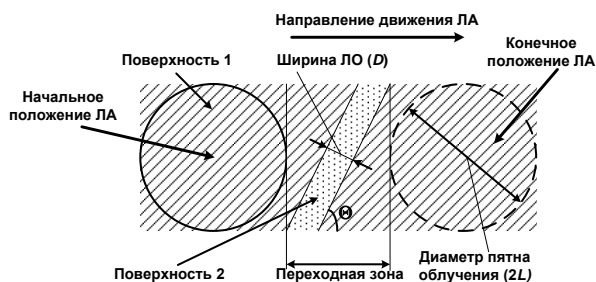


Fig.3. The results of model experiment for LO, with $D=0,8L$, terrain combination "asphalt/forest"

Таблица 1.

Возможность обнаружения ПО при воздействии
аддитивного нормального шума

SN=0dB		SN=10dB		SN=20dB		SN=30dB	
D=0, 1L	D=0, 8L	D=0, 1L	D=0, 8L	D=0, 1L	D=0, 8L	D=0, 1L	D=0, 8L
FAF	FAF	FAF	FAF	FAF	FAF	FAF	FAF
FWF	FWF	FWF	FWF	FWF	FWF	FWF	FWF
GWG	GWG		GWG		GWG		GWG
BAB	BAB		BAB				
BWB		BWB	BWB	BWB	BWB	BWB	BWB
MAM	MAM		MAM		MAM		MAM
MWM	MWM	MWM	MWM	MWM	MWM	MWM	MWM
SWS	SWS		SWS		SWS		SWS
	ABA						
	WGW		WGW		WGW		WGW
	WMW		WMW		WMW		WMW
	WSW		WSW		WSW		WSW
			AFA		AFA		AFA
			WFW		WFW		WFW
					AGA		
			AMA		AMA		AMA
			GAG		GAG		GAG

протяженным объектом является поверхность типа «вода» на фоне рассеивающих поверхностей, таких как «луг» или «лес». Отметим, что реальная ширина ПО сильно зависит от высоты полета, и узкие ПО могут быть обнаружены на более низкой высоте.

В таблице 1 обозначено следующее: SN — отношение сигнал/шум, А — асфальт, В — кустарник, С — бетон, F — лес, G — трава, М — луг, N — земля, S — снег, W — вода. Также в таблице серым цветом показаны случаи ложного обнаружения ПО, что обусловлено схожестью природы сигнала и шума. Такие случаи необходимо исключить из рассмотрения.

Таблицу 1 можно использовать для выбора ПО в реальном эксперименте при выдаче рекомендаций по траектории движения ЛА.

III. Доплеровская фильтрация

В данном разделе рассматривается применение доплеровской фильтрации (ДФ), как средства повышения разрешающей способности, для решения задачи обнаружения местоположения ПО.

Согласно [2], на подстилающей поверхности образуются линии равных доплеровских частот (см. рис. 4), обусловленные равными радиальными скоростями ЛА относительно подстилающей поверхности. Исследуем условия применения ДФ, необходимые для обеспечения наибольшей $R_{\text{пр.разл.}}$

Для проверки было проведено три серии испытаний. В одном испытании менялось угловое положение полосы доплеровского фильтра (см. рис. 5), и оценивалась вероятность правильного различения ($P_{\text{пр.разл.}}$) подстилающих поверхностей [1].

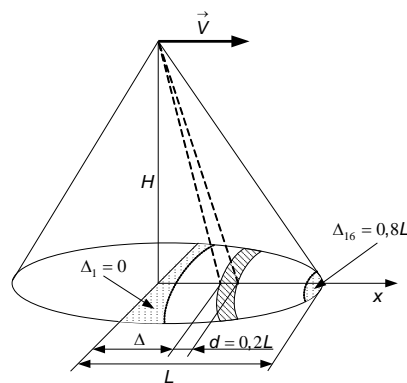


Рис. 5. Модельный эксперимент по определению наилучших условий применения ДФ

Fig. 5. The model experiment of finding best conditions of Doppler filtration application

Получено, что наибольшую вероятность правильного различения обеспечивает угловое положение, соответствующее надиру (на рис. 5 обозначено Δ_1). На рис. 6 приведены результаты испытаний.

Аналогично проводился другой эксперимент. Изменялась ширина полосы доплеровского фильтра при оптимальном угловом положении полосы доплеровского фильтра, согласно предыдущему эксперименту. В результате, было получено, что минимальная d обеспечивает наибольшую $P_{\text{пр.разл.}}$.

Таким образом, в процессе исследования получено, что ДФ обеспечивает наилучшее различение подстилающих поверхностей при малой

ширине полосы доплеровского фильтра ($d \leq 0,2L$) и направлении облучения совпадающим с надиром (см. рис. 5).

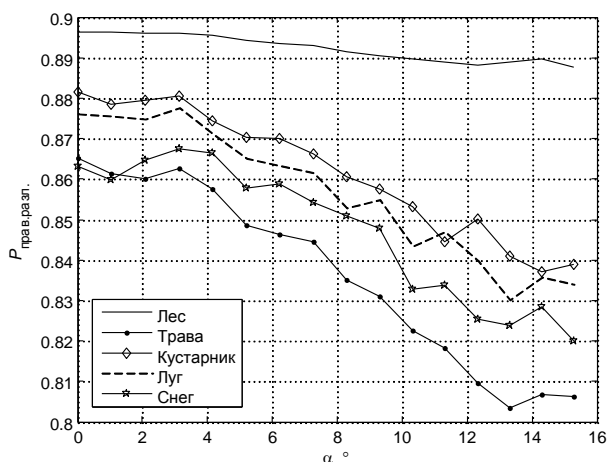


Рис. 6. Зависимость $P_{\text{пр,разл}}(\alpha)$ для сочетаний типовых фоновых поверхностей с «водой»

Fig. 6. Dependence $P_{\text{пр,разл}}(\alpha)$ for combination "water" and some background terrains

Применение доплеровской фильтрации обеспечивает повышение разрешающей способности РВС, что позволяет обнаруживать узкие ПО, но, одновременно, может препятствовать их обнаружению в случае ориентации ПО под углом к полосе доплеровского фильтра.

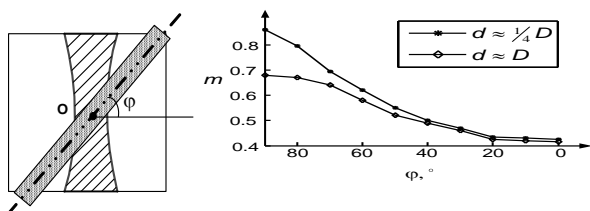


Рис. 7. Модельный эксперимент $m(\phi)$ для двух соотношений d и D

Fig. 7. The model experiment $m(\phi)$ for two ratios between d and D

На рис. 7 показана относительная доля ПО в полосе доплеровского фильтра (m) в зависимости от угла ориентации ПО (ϕ). Согласно проведенному модельному эксперименту, показано, что наибольший вклад в отраженный сигнал вносится ПО в том случае, когда он ориентирован в направлении полосы доплеровского фильтра, при повороте на угол $\phi = 30^\circ$, доля ПО уменьшается вдвое. В результате сделан вывод, что преимущества ДФ проявляются только при $\phi \geq 30^\circ$. При этом наибольшая $P_{\text{пр,разл}}$ обеспечивается при $\phi = 90^\circ$, поскольку наилучшие

Проведя эксперимент аналогичный эксперименту в [1], обобщим в таблице 1 количество различаемых подстилающих поверхностей при изменении соотношения сигнал/помеха (sn) и ширины ПО (D).

Данные в таблице 2 обеспечивают обнаружение ПО с вероятностью $P_{\text{пр,разл}} > 0,6$ для ϕ изменяющегося от 30° до 90° . В результате такого эксперимента показано, что изменение соотношения сигнал/помеха приводит к изменению количества обнаруживаемых типов ПО (снижение sn приводит к возрастанию количества различаемых

подстилающих поверхностей), также увеличение ширины ПО приводит к возрастанию количества различаемых подстилающих поверхностей.

Сравнение результатов моделирования с типовым режимом показало, что ДФ позволяет обнаруживать число ПО примерно в два раза большее, чем алгоритм в типовом применении РВС.

Таблица 2.
Возможность обнаружения ПО при воздействии аддитивного нормального шума

N=0дБ		SN=10дБ		SN=20дБ		SN=30дБ	
D=0, 1L	D=0, 8L	D=0, 1L	D=0, 8L	D=0, 1L	D=0, 8L	D=0, 1L	D=0, 8L
FAF, FWF, GWG, BWB, MWM, SWS	FAF, FWF, GWG, BWB, MWM, SWS, WSW, AFA	FAF, FWF, GWG, BAB, BWB, MAM, MWM, SWS, GAG	FAF, FWF, GWG, BAB, BWB, MAM, MWM, SWS, ABA, WGW, WMW, WSW, WFW, AGA, AMA, GAG, WBW	FAF, FWF, GWG, BAB, BWB, MAM, MWM, SWS, ABA, WGW, WMW, WSW, WFW, AGA, AMA, GAG, WBW, ASA	FAF, FWF, GWG, BAB, BWB, MAM, MWM, SWS, GAG, SAS	FAF, FWF, GWG, BAB, BWB, MAM, MWM, SWS, ABA, WGW, WMW, WSW, WFW, AGA, AMA, GAG, WBW, SAS, ASA	FAF, FWF, GWG, BAB, BWB, MAM, MWM, SWS, ABA, WGW, WMW, WSW, WFW, AGA, AMA, GAG, WBW, SAS, ASA

IV. Экспериментальные исследования

Эксперимент проводился совместно с УПКБ «Деталь». Было исследовано два полета, которые проводились для внутренних нужд предприятия. Полеты проводились по сходным траекториям на трех высотах: 60м, 100м и 300м. Условия полета были различны, в эталонном эксперименте и проверочном, в первом случае была дождливая погода, во втором случае были сухие погодные условия. Результаты полетов обрабатывались с помощью алгоритма из [1].

Для летного эксперимента данные радиовысотомера [2] синхронизировались с данными спутниковой навигационной системы (СНС) и с данными видеозаписи (см. рис. 8). Таким образом, удалось отследить смену типа подстилающей поверхности с точностью до нескольких метров.



Рис. 8. Схема проведения летных испытаний
Fig.8 The scheme of flight experiment

Также была разработана программная оболочка на языке MATLAB, позволившая реализовать обработку полетных данных в соответствии с алгоритмом обработки.

Далее, данные подвергались многоступенчатой обработке. На первом этапе показания радиовысотомера приводились к виду, пригодному

для анализа (формировались пачки импульсов, рассчитывались квадратуры с учетом АР, АРУ и многочисленных флагов). На следующем этапе формировались гистограммы отраженных сигналов. В эталонном испытании эти гистограммы определялись в соответствии с типом подстилающей поверхности. Для их расчета определялись участки однородного искомого типа поверхности, где ЛА не совершает маневров. Такие участки для различных высот подвергались нормировке к высоте полета, и, по усредненным данным строилась эталонная гистограмма. В результате, были получены эталонные гистограммы для подстилающих поверхностей типа «вода», «лес», «вспаханное поле», «луг». Также были получены эталоны для случая применения доплеровской фильтрации.

По второму эксперименту обрабатывались данные для всей трассы полета с применением алгоритма из [1], в результате были получены графики зависимости вероятности правильного обнаружения от времени (пример на рис. 9).

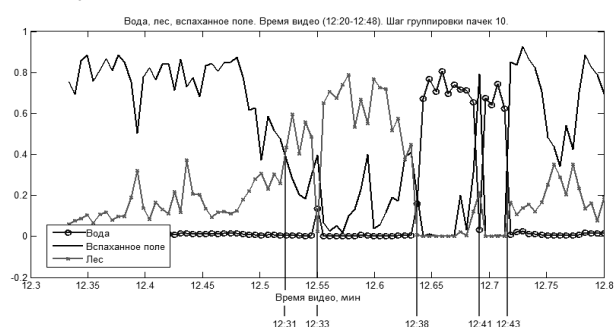


Рис. 9. Вероятности правильного обнаружения для различных типов подстилающей поверхности на участке полета

Fig. 9. The probability of correct detection for different terrains during the flight

Графики зависимости вероятности правильного обнаружения от времени анализировались с использованием видеозаписи. Согласно критерию Неймана-Пирсона, задавался оптимальный порог, обеспечивающий максимальную вероятность правильного обнаружения при фиксированном уровне ложной тревоги. По результатам анализа были составлены таблицы правильного обнаружения и ложных тревог.

В таблице 3 обозначено: порог $P_{\text{доп.фильтр}}^{\text{опт.}} \rightarrow$ оптимальный порог вероятности правильного обнаружения в типовых условиях применения; порог $P_{\text{доп.фильтр}}^{\text{опт.}} \rightarrow$ оптимальный порог вероятности правильного обнаружения с применением ДФ;

$\langle N_{\% \text{доп.фильтр}} \rangle \rightarrow$ процент верно обнаруженных объектов для типового применения РВС;

$\langle N_{\% \text{доп.фильтр}} \rangle \rightarrow$ процент верно обнаруженных объектов для случая ДФ.

Таблица 3.

Сводная таблица результатов по исследованным типам подстилающих поверхностей

Тип поверхности	Вода	Лес	Поле	Луг
Порог $P_{\text{доп.фильтр}}^{\text{опт.}}$	0,4	0,6	0,6	0,6
Порог $P_{\text{доп.фильтр}}^{\text{опт.}}$	0,4	0,5	0,6	0,5
$\langle N_{\% \text{доп.фильтр}} \rangle$	44	27	43	63
$\langle N_{\% \text{доп.фильтр}} \rangle$	60	31	31	54

Согласно таблице 3, в ходе летных испытаний получено, что в типовых условиях применения обеспечивается обнаружение «воды» в 44% случаев, «леса» — 27% (поскольку «лес» — существенно неоднородная подстилающая поверхность), «луг» — 63%, и «поле» — 43%. При этом, применение ДФ позволяет повысить вероятность обнаружения узких ПО (ширина ПО < 1/4 ширины пятна облучения) типа «вода» на 15%, но при этом снижается вероятность обнаружения объектов типа «поле» и «луг», поскольку эти типы подстилающих поверхностей обладают широкой ДОР, что приводит к снижению вклада поверхностей данного типа в отраженный сигнал.

Таким образом, рекомендуется проводить как ДФ обработку, так и типовую, в зависимости от типа подстилающей поверхности для повышения вероятности правильного обнаружения.

В рамках развития исследования, планируется проведение серии летных испытаний над однородными подстилающими поверхностями для формирования базы эталонов.

V. Заключение

В статье были получены следующие значимые результаты:

1. Рассмотрены два случая применения разработанного алгоритма: типовой режим работы РВС

и режим доплеровской фильтрации. Показано, что режим доплеровской фильтрации позволяет повысить количество различаемых типов подстилающих поверхностей до двух раз.

2. Проведены натурные испытания, подтвердившие верность разработанных алгоритмов.

Результаты исследования позволяют выбрать протяженные объекты, пригодные для навигации летательного аппарата.

VI. Литература

- [1] Sorokin A. K., Vazhenin V. G., Shalgin V.V. Determination algorithm of underlying surfaces border position by pulse altimeter signal 2014 24nd Int. Crimean Conf. "Microwave & Telecommunication Technology" (CriMiCo'2014). Sevastopol, 2014, pp. 1163 -1164.
- [2] Skolnik M. I., "Radar Handbook", Third Edition. The McGraw-Hill Companies, 2008. 1351p.
- [3] Ulaby F. T. Handbook of Radar Scattering Statistics for Terrain. ARTECH HOUSE, 1989. 358p.